

Modelos de riesgo para túneles. Estado del arte

Risk models for tunnels. State-of-the-art

Enrique Alarcón Álvarez. Dr. Ingeniero de Caminos Canales y Puertos y Licenciado en Ciencias Físicas. Catedrático Numerario de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Madrid. Académico de la Real Academia de Ingeniería. Catedrático Modelado de Ingeniería Mecánica. Animador del WG6 y Secretario de la Universidad Politécnica de Madrid. enrique.alarcon@upm.es

Ignacio del Rey Llorente. Dr. Ingeniero Industrial por la UPM e Ingeniero del ICAI. Responsable del departamento de Ventilación y seguridad frente a incendio del CEMIM. Secretario hispanohablante del Comité C4 de Túneles de PIARC. idelrey@etsil.upm.es

Resumen: Bajo el título "Modelos de riesgo para túneles. Estado del arte", se describe la ponencia presentada por Enrique Alarcón en el V Simposio de Túneles celebrado el pasado mes de febrero en Bilbao en la que se comparan los modelos que se utilizan en diferentes países analizando sus ventajas e inconvenientes. Los accidentes catastróficos concentrados alrededor del cambio de siglo han dado lugar al cambio de paradigma sobre las exigencias de seguridad y han aumentado el énfasis sobre la importancia de la toma de decisiones basada explícitamente en criterios objetivos de determinación del riesgo tal como obliga la Directiva 2004/54/EC de la Unión Europea. Cada país ha intentado adecuarse a ella recomendando tipos de procedimientos diferentes.

Palabras Clave: Análisis de riesgo; Seguridad; Túneles; Árboles de fallo; RD 635; Curvas f-N; Directiva Europea 2004/54; Metodología

Abstract: The paper "Risk models for tunnels. State-of-the-art", presented by Enrique Alarcón at the V Symposium on Tunnels held last February in Bilbao, makes a comparison of the models employed in different countries and considers the advantages and disadvantages of the same. The catastrophic accidents that have occurred around the turn of the century have given rise to a shift in the paradigm concerning safety requirements and have led to increased emphasis on the importance of decision making specifically based on objective risk assessment criteria, as established by the EU 2004/54/EC Directive. Each country has attempted to meet these requirements through the recommendation of different types of procedure.

Keywords: Risk analysis, Safety; Tunnel, Fault Tree; RD 365; f-N Curves; European Directive 2004/54; methodology

1. Introducción

La construcción de túneles está íntimamente ligada al aumento de las exigencias sobre trazado de las carreteras y ha experimentado un desarrollo explosivo con el crecimiento de la actividad económica y el incremento del número de vehículos particulares.

Puentes y túneles han visto por ello aumentada su importancia en número y longitud y ha crecido igualmente la responsabilidad de los servicios de explotación quienes pasan a jugar un papel clave tanto en el mantenimiento del trazado como en la seguridad del tráfico que les es exigida por los individuos y por las agrupaciones sociales.

Todo ello está relacionado con un fenómeno bien conocido relacionado con la percepción pública del riesgo, que no es igual para situaciones de alta proba-

bilidad y pocas consecuencias o para aquéllas de baja probabilidad y muchas consecuencias. Para evaluar éstas últimas se suele hablar en la literatura anglosajona de la regla de las 3 D: **deaths, dollars and downtime** que, manteniendo las iniciales sería traducible como "coste" de los decesos, dinero y demoras.

Un ejemplo clásico de medida de las consecuencias en número de muertes es el gráfico de frecuencias de la figura 1 (U.S. N.R.C. 1975), tipo de representación sobre el que se tratará más adelante.

Midiendo las consecuencias en número de muertes podría decirse que en el caso de los túneles de carretera una catástrofe como el incendio, con gran impacto en la opinión pública, se mantenía en niveles asumibles hasta finales del siglo pasado. Repentinamente, entre 1999 y 2001 se registraron 4 incendios

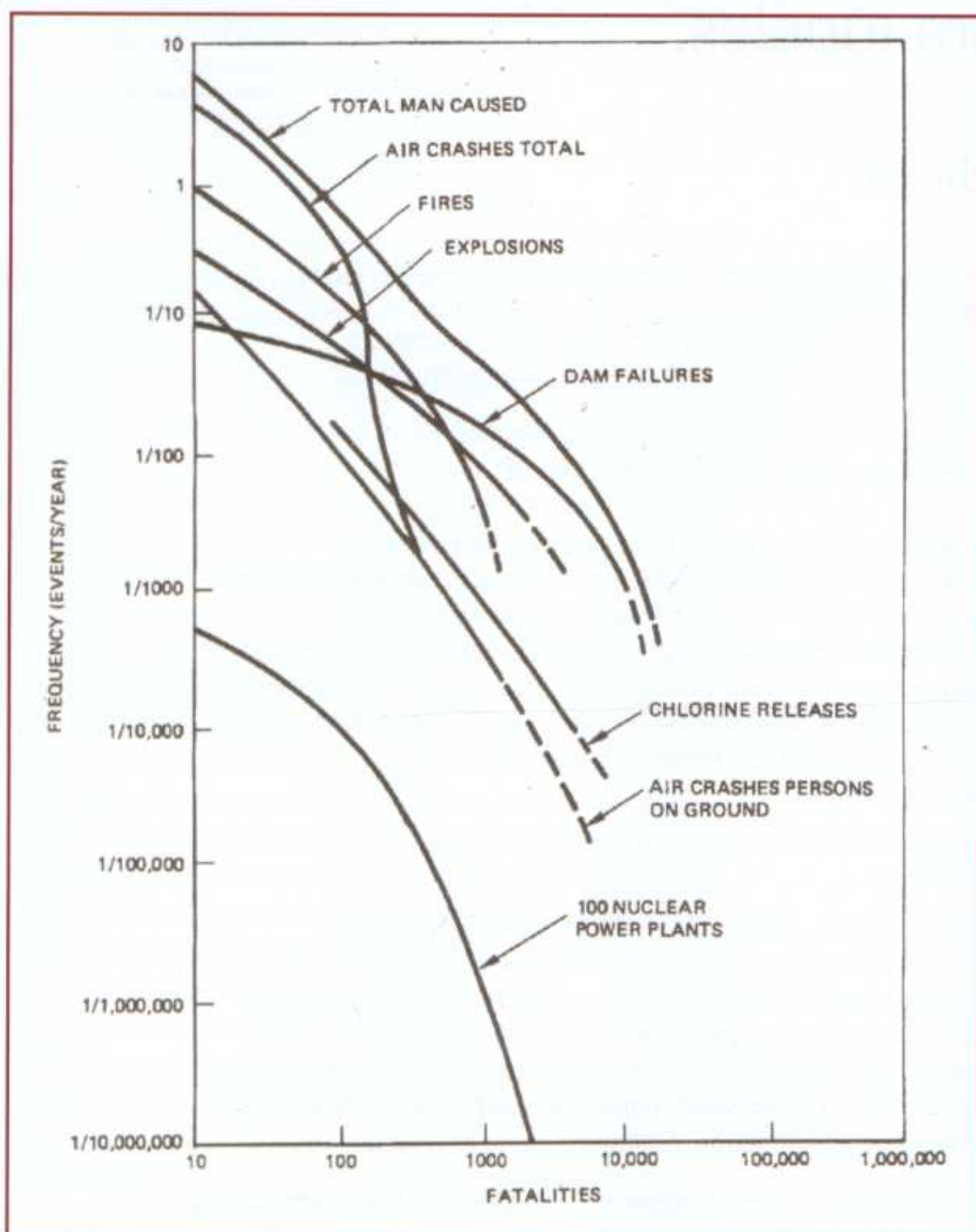


Fig. 1.
Frecuencia de
sucesos
conducentes a
N o más
muertes.

que provocaron un total de 70 muertos, siendo el más dañino el que originó la catástrofe del Mont Blanc con 39 muertos. Además, aunque no era de carretera, en Noviembre de 2000 se produjeron 170 muertos en un incendio del funicular de Kaprun cuando el vagón circulaba por el interior del túnel de llegada.

Ello produjo una alarma social inmensa y la intervención de las autoridades nacionales y comunitarias que condujo a la publicación el 29 de abril de 2004 de una Directiva europea que hace obligatorio para todos los países el planteamiento de una metodología de "Análisis de Riesgos" que sirva como instrumento para conseguir niveles de seguridad semejantes en la red transeuropea de carreteras.

Desde entonces se han multiplicado los esfuerzos en los diferentes países miembros de la Unión y, en este momento, la variedad de las soluciones propuestas es tal que no existe una metodología unificada a la que acogerse.

En este artículo se enumeran en primer lugar los hitos históricos que muestran la evolución de las ideas; a continuación se describen someramente algunos conceptos y herramientas que se manejan habitualmente y, para finalizar, se describe la estructura de algunos métodos actualmente en uso en países de la Unión Europea.

2. Evolución y contexto

Como se dijo más arriba, el año 1999, en que se produjeron los incendios en Mont Blanc (39 muertos) y Tauern (12 muertos), marca un antes y un después en la historia de la normativa relacionada con la seguridad frente a incendios.

Existía una tradición de análisis probabilista en el campo de la seguridad estructural que había sido iniciado por Freudenthal a mitad de los años 40 y desarrollado por Torroja desde su puesto en el Comité Europeo del Hormigón que defendía un enfoque basado en estados límites y factores de ponderación que, calibrados con métodos probabilistas de nivel II, alteraban mínimamente los hábitos de cálculo de los proyectistas.

Este enfoque acogido entusiásticamente en Dinamarca, Alemania y Estados Unidos podía haber servido de modelo en el caso de los túneles. Los progresos de la teoría de la decisión y el enfoque bayesiano de la probabilidad unidos a los riesgos implícitos en los sectores nuclear y aeroespacial fueron los que finalmente condujeron a la realización de los primeros estudios probabilistas de riesgo (PRA) que, recibidos con desconfianza en un principio, fueron considerados con más atención tras los accidentes de Three Mile Island de 1979 o del Challenger en 1986 cuando se vio que, estimaciones de respectivos PRA, despreciadas como aparentemente pesimistas en su momento, habrían resultado decisivas de haber recibido mayor atención por los responsables. En 1981 la Nuclear Regulatory Commission lanzó el "Manual de árboles de fallo" y en 1983 la "Procedures Guide" para PRA que contribuyeron a difundir en otras especialidades el uso de estos métodos.

La tendencia fue seguida por la industria química europea que, desde el año 78, procedió a estudios sistemáticos que recibieron el impulso definitivo tras el accidente de Seveso que originó en 1982 la emisión de una Directiva europea en la que, como claro pre-

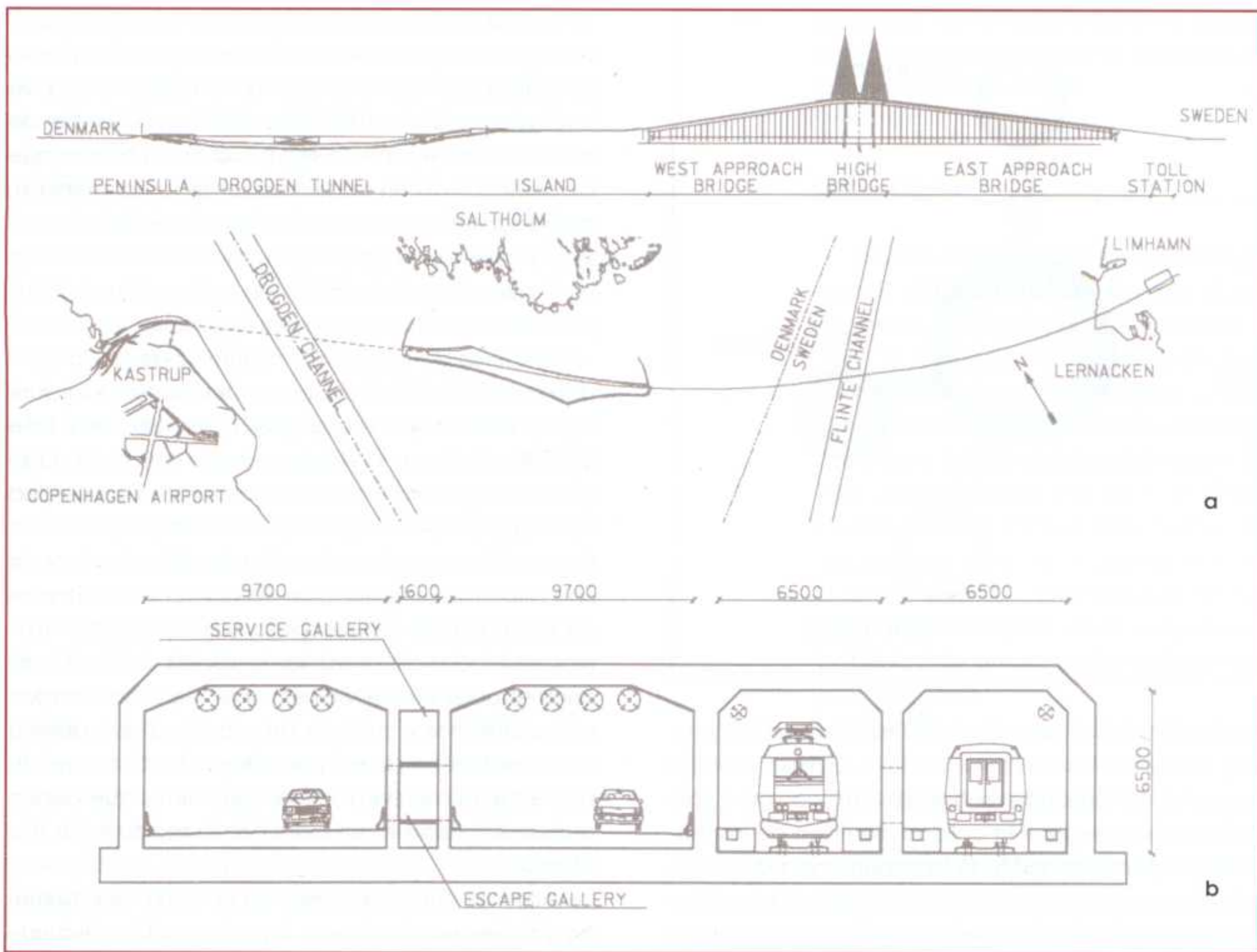


Fig. 2.
a) sección longitudinal del túnel de 3,7 km bajo el canal Drogben.
b) sección transversal de los tubos para el tráfico de carretera y ferroviario.

cedente de la situación que nos ocupa, se recomendaba que cada país asumiera la responsabilidad de desarrollar su metodología para el análisis y la gestión del riesgo. Holanda condujo una profunda investigación sobre métodos para la determinación cuantitativa del riesgo relacionado con el procesado industrial de objetos potencialmente peligrosos y emitió una normativa de obligado cumplimiento por las empresas que incluía la elaboración periódica de un Informe Externo de Seguridad.

No es por ello extraño que la Normativa holandesa para túneles (KIVI) que fue presentada en España en el Congreso de Gijón de 1994 recogiese ya un enfoque probabilista importante y que sus expertos tuviesen un papel destacado en el proyecto OCDE-PIARC que entre los años 1995-2001 produjo las primeras versiones del programa DGQRAM donde se desarrolla una metodología de análisis de riesgos para transporte de mercancías peligrosas que llega hasta hoy en día.

Algunas obras de ingeniería civil de excepcional importancia comenzaron a ser tratadas con las técnicas de PRA. Una de las que tuvo mayor repercusión fue la dedicada a la unión fija entre Dinamarca y Suecia a través del Øresund (figura 2).

Su estudio PRA fue presentado por Karlsson y Ditlevsen en la reunión convocada en 1995 en la ETH de Zürich por J. Schneider (autor de una excelente obra sobre análisis probabilista, para analizar el estado del arte y su posible aplicación para el estudio PRA del gran túnel ferroviario San Gotardo).

Para entonces la Comisión de las Comunidades Europeas (CEC), tras constatar la proliferación de modelos destinados a estudios de peligrosidad en ambientes industriales había creado en 1992 el MEG (Model Evaluation Group) encargado de mejorar la cultura relacionada con el uso de modelos matemáticos para el estudio de riesgos y para ayudar a la CEC en la selección de aspectos necesitados de investigación más profunda. En este grupo tuvieron un papel

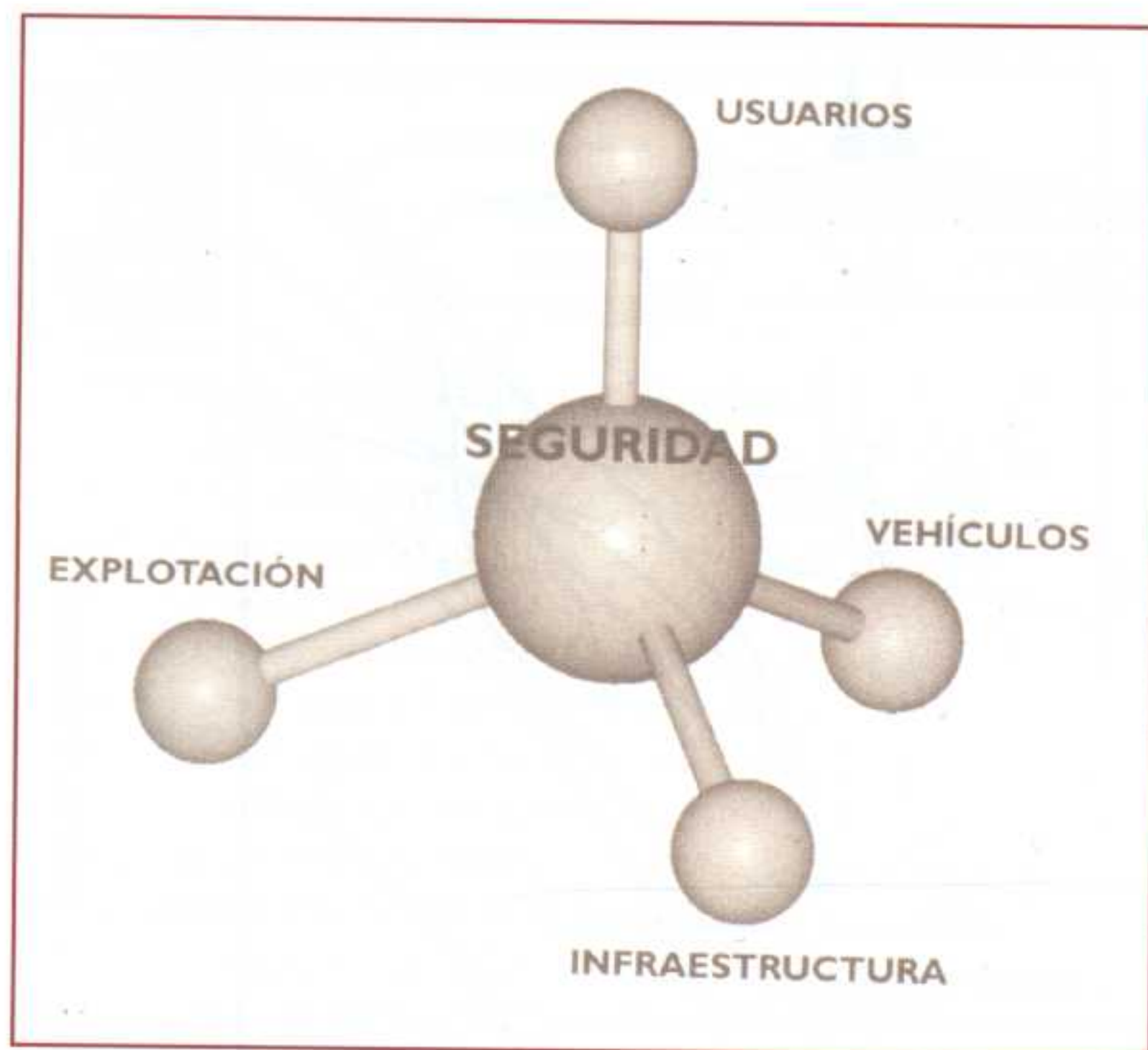


Fig. 3. Aspectos que influyen en la seguridad de un túnel.

predominante los miembros del Risø National Laboratory danés y los holandeses de TNO, quienes crearon un protocolo aplicable al estudio, verificación y validación para asegurar la calidad científica de los métodos, la comprobación de la congruencia de los resultados con las predicciones del modelo y con el establecimiento de un proceso de comprobación de su validez (selección de la base de datos, selección de parámetros, estimación de la incertidumbre, comparaciones, etc.) Como se decía en el apartado anterior, en el período 1995-2001 se lanzó un programa de cooperación entre la OCDE y PIARC titulado "Transport of dangerous goods through road tunnels" que pretendía, mediante el desarrollo de métodos de evaluación del riesgo, racionalizar y armonizar el proceso de toma de decisiones respecto a las rutas más convenientes para el transporte de mercancías peligrosas. El proyecto, financiado por 11 países, condujo a la elaboración del programa DG-QRAM y a una clasificación de túneles basada en el riesgo de explosiones, fugas de gases o líquidos volátiles e incendio, así como a un principio de clasificación de túneles por categorías según el riesgo de la carga que tiene prohibido su paso por ellos, clasificación que ha llegado hasta nuestros días con la incorporación al ADR 2007. El informe final OCED/PIARC se publicó en Octubre de 2001 y el propio programa DG-QRAM fue terminado y depurado entre 2001-2005.

Tras las catástrofes de Mont Blanc y Tauern los países implicados procedieron a la reconsideración de su normativa y la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas (UNECE) publicó en diciembre de 2001 un informe sobre la seguridad en los túneles que incidía (figura 3) en la necesidad de tomar medidas, acordadas en toda Europa, sobre las exigencias no sólo a vehículos e infraestructuras sino a la formación de los usuarios y al desarrollo de una gestión de la explotación basada en principios racionales.

Los Jefes de los Estados miembros de la Comunidad Europea, acuciados por la demanda social, lanzaron redes de proyectos (DARTS, UNTUN, SAFE TUNNEL, FIT, etc.) pero la elaboración de una política común de seguridad en los túneles no fue una prioridad hasta que en 2001 se produjo la catástrofe del Gotardo con 11 muertos y se tomó la decisión de preparar una Directiva Europea. Ésta, 2004/54/EC, fue publicada el 24 de abril de 2004 para fijar los requisitos mínimos en túneles de la red transeuropea. En sus 20 artículos establece condiciones sobre responsabilidades, procedimientos y medidas de seguridad aplicables a todos los túneles de más de 500 m., tanto a nivel de proyecto, como para los ya construidos que deben reacondicionarse en un plazo comprendido entre 10 y 15 años.

Además, todos los países de la Unión, más Noruega y Suiza, procedieron a trasponer la Directiva que adoptó el enfoque global de UNECE tendente a la prevención y reducción de consecuencias. Respecto a la metodología de análisis de riesgos, en su artículo 13, se establece su obligatoriedad lo que, como se decía en la Introducción, representa una evolución por decreto desde las Normas prescriptivas a un nuevo paradigma que, hasta ese momento, no había sido universalmente aceptado. Sin embargo la Directiva no especifica el método tipo ni establece criterios fijos de gestión de riesgo, dejando en libertad a los diferentes Estados miembros para seleccionar su propia metodología. También sugería que el 30 de abril de 2009 publicaría un informe sobre la práctica adoptada por cada Estado para lo que se apoyaría en el asesoramiento de PIARC.

De hecho, en el propio Comité de túneles de PIARC, se organizó durante el ciclo 2004-2007 el "Working Group 2" sobre "Management of Road Tunnel Safety" formado por 30 miembros de 16 países entre los que se encuentran Japón y Estados Unidos. En su primera publicación de 2005 sobre "Study

on Risk Management for Roads", PIARC desarrollaba los principios del tratamiento del riesgo y la gestión de las emergencias. Este trabajo preliminar ha sido completado en 2008 mediante un informe con una extensión de casi 250 páginas en que se tratan los principios básicos del análisis de riesgo (capítulo 1), la metodología para el cálculo y la gestión (capítulo 2), el estado del arte en algunos países miembros de PIARC (capítulo 3) y un análisis detallado (capítulo 4) de los métodos usados en la práctica por los técnicos de Austria, Holanda, Francia e Italia, incluyéndose también una descripción del DG-QRAM citado anteriormente. La publicación se completa con 3 apéndices con algunos ejemplos prácticos. A falta del informe prometido en la Directiva, la publicación de PIARC es posiblemente el documento más completo de que se dispone en este momento para análisis comparativos de normativa.

Por otro lado, las modificaciones incorporadas en julio del 2007 al Acuerdo europeo sobre el transporte internacional de mercancías peligrosas por carretera, anteriormente citado, establecen una clasificación de las mercancías peligrosas, mediante el denominado Código de Restricción en Túnel, de acuerdo con cinco categorías (A, B, C, D, E) en función del peligro potencial de explosión, fuga tóxica o incendio. Este código se relaciona con el túnel a través del cual pueden ser transportadas, con objeto de seleccionar itinerarios recomendados de transporte (ITRP). Este acuerdo, ratificado por nuestro país y aceptado por los agentes institucionales y sociales involucrados, es obligatorio a partir de Enero de 2010 e implica de nuevo el uso sistemático de una herramienta basada en la evaluación cuantitativa de riesgos.

En noviembre de 1998 el Ministerio de Fomento publicaba la Instrucción para el proyecto, construcción y explotación de obras subterráneas para el transporte terrestre (IOS-1998) complementada, tras el incendio en el túnel de Mont Blanc, por un borrador de Nota de Servicio de la Dirección General de Carreteras sobre el equipamiento de los túneles de Carretera, mientras la Dirección General de Ferrocarriles se embarcaba en la elaboración de una Norma aunque, desgraciadamente, sin superar la etapa de borrador.

Desde la aparición del R.D. 635/2006, el Ministerio de Fomento exige una auditoría externa del anejo de seguridad de los proyectos para comprobar su adaptación a aquél. Algunas empresas e instituciones (IDOM, EUROESTUDIOS, CEMIM, etc.) han desarrollado

su propia metodología, pero no puede decirse que exista un "método español" equivalente a los mostrados en el informe PIARC.

3. Conceptos

Una de las primeras citas que relaciona más claramente las ideas de peligrosidad (hazard) y consecuencias con el concepto de riesgo se remonta a 1662 "El terror que sienten las personas por los truenos es irracional puesto que el temor al daño debería ser proporcional no sólo a la gravedad del perjuicio sino también a la probabilidad del suceso y como casi no hay ningún tipo de muerte más infrecuente que la muerte por una tormenta de truenos, difícilmente haya una que debería ocasionar menos temor". Algo después, en 1730, Daniel Bernoulli introduce la idea de esperanza "moral" o utilidad esperada como la probabilidad de un resultado multiplicada por su valor para el agente"

Queda así una expresión del tipo

$$\text{Riesgo} = \text{Peligrosidad} \times \text{Daño}$$

O, como se utiliza en ingeniería sísmica,

$$\text{Riesgo} = \text{Peligrosidad} \times \text{Vulnerabilidad} \times \text{Valor}$$

Si se agrupan los dos últimos términos en el más general de "Consecuencia" se obtiene

$$\text{Riesgo} = \text{Peligrosidad} \times \text{Consecuencias}$$

Donde peligrosidad es la probabilidad de superación de un determinado nivel de la amenaza, en un cierto intervalo de tiempo y en un emplazamiento dado.

Algunos autores introducen una variante

$$\text{Riesgo} = \frac{\text{Peligrosidad}}{\text{Medidas preventivas}}$$

con objeto de remarcar la inexistencia práctica del riesgo nulo.

El análisis de riesgos es una metodología completa que da sus mejores frutos si se adopta con carácter general.

En este sentido debe entenderse que el análisis cuantitativo incluye:

- Una política global desde las instituciones gubernamentales nacionales o supramacionales.
- Una gestión del riesgo
- La definición de los criterios de aceptabilidad.
- Una metodología de análisis
- Una adopción de medidas reductoras

3.1. Análisis de riesgo

El análisis de riesgos comprende:

- La descripción del sistema y la recolección de información básica.
- La identificación de los peligros (averías, colisiones, fuego, explosiones, etc.)
- El cálculo de las frecuencias y consecuencias
- La determinación del riesgo individual y los perfiles de riesgo, también llamados riesgos colectivos.
- La comparación con criterios de aceptabilidad o túneles patrón que sean considerados seguros.
- El análisis debe ser completado por la **gestión de riesgos** entre los que cabe incluir el almacenamiento, ordenación y actualización sistemática de la información.

Finalmente deben aplicarse las medidas correctoras en la propia obra o en sus alrededores que reduzcan los riesgos anteriores.

El proceso seguido en el análisis de riesgo se suele esquematizar mediante un gráfico de "mariposa" en que el centro lo ocupa el llamado suceso desencadenante y a izquierda y derecha respectivamente se identifican los sucesos que han llevado al suceso crítico y las consecuencias que se desprenden de él.

El desarrollo del suceso se hace reconstruyendo hacia atrás mediante **árboles de fallo las posibles causas que lo han originado**. Es un análisis muy interesante pues, en la etapa de corrección de errores, permite tomar decisiones sobre medidas de prevención.

El desarrollo del incidente, que sirve para analizar los efectos que el suceso desencadenante puede producir, se hace mediante **árboles de sucesos** que al combinarse producen **escenarios de cálculo**. En la etapa de corrección de errores, esta estructura permite tomar decisiones sobre equipamientos de seguridad, medidas de evacuación, etc. Por ejemplo un análisis detallado de la duración de cada secuencia de sucesos puede contribuir a una planificación realista de las medidas de emergencia.

El informe PIARC de 2008 establece dos **familias** o **tipos de riesgos**: el enfoque mediante **escenarios** y el enfoque **sistémico**.

En el primero se selecciona un conjunto de escenarios relevantes y se estudian su frecuencia y sus consecuencias. El establecimiento del riesgo se hace separadamente para CADA escenario INDIVIDUAL.

En el enfoque **sistémico** se estudia el sistema total mediante un proceso integrado que incluye TODOS los escenarios relevantes para el riesgo del TUNEL, con lo que se obtienen valores de riesgo para el sistema total.

Dentro de cada familia los métodos pueden ser **cualitativos** o **cuantitativos**. Los primeros están basados en el conocimiento acumulado y en el juicio de expertos sobre escenarios posibles que, a veces, se organizan mediante matrices de daño en la que se identifican frecuencias de sucesos y consecuencias. Las frecuencias se agrupan en categorías cualitativas del tipo de "muy frecuente", "ocasional", "muy raro", etc mientras que las consecuencias se tipifican por categorías de intensidad como "poca o nula", "significativa", "crítica", "catastrófica" etc.

Podría decirse que se trata de métodos **semicuantitativos** que enlazan con la práctica prescriptiva habitual.

Los métodos cuantitativos aplican la teoría de los árboles de decisión, incluyendo en las ramas de los árboles de fallo y de sucesos las probabilidades relativas de cada acontecimiento. Con ello se puede representar para cada rama final la probabilidad encadenada y estudiando las consecuencias inducidas (medida según PIARC en número de muertos) establecer el par (frecuencia, consecuencia) que sirve para definir el riesgo.

Aquí cabe distinguir de nuevo dos alternativas. Normalmente para cada caso, a pesar de trabajar con un enfoque probabilista, se termina con dos valores numéricos: uno para la frecuencia y otro para las consecuencias, de modo que el cálculo conduce, para cada caso final, a un único valor (el área de la figura 4 adjunta).

Sin embargo frecuencia y consecuencias son valores estocásticos que deberían definirse mediante distribuciones de probabilidad, de modo que el riesgo es igualmente una variable estocástica.

3.2. Las curvas F-N.

Buscando una representación del riesgo total, los pares de valores (frecuencia, consecuencia) pueden ordenarse y establecer una curva (f, N) de frecuen-

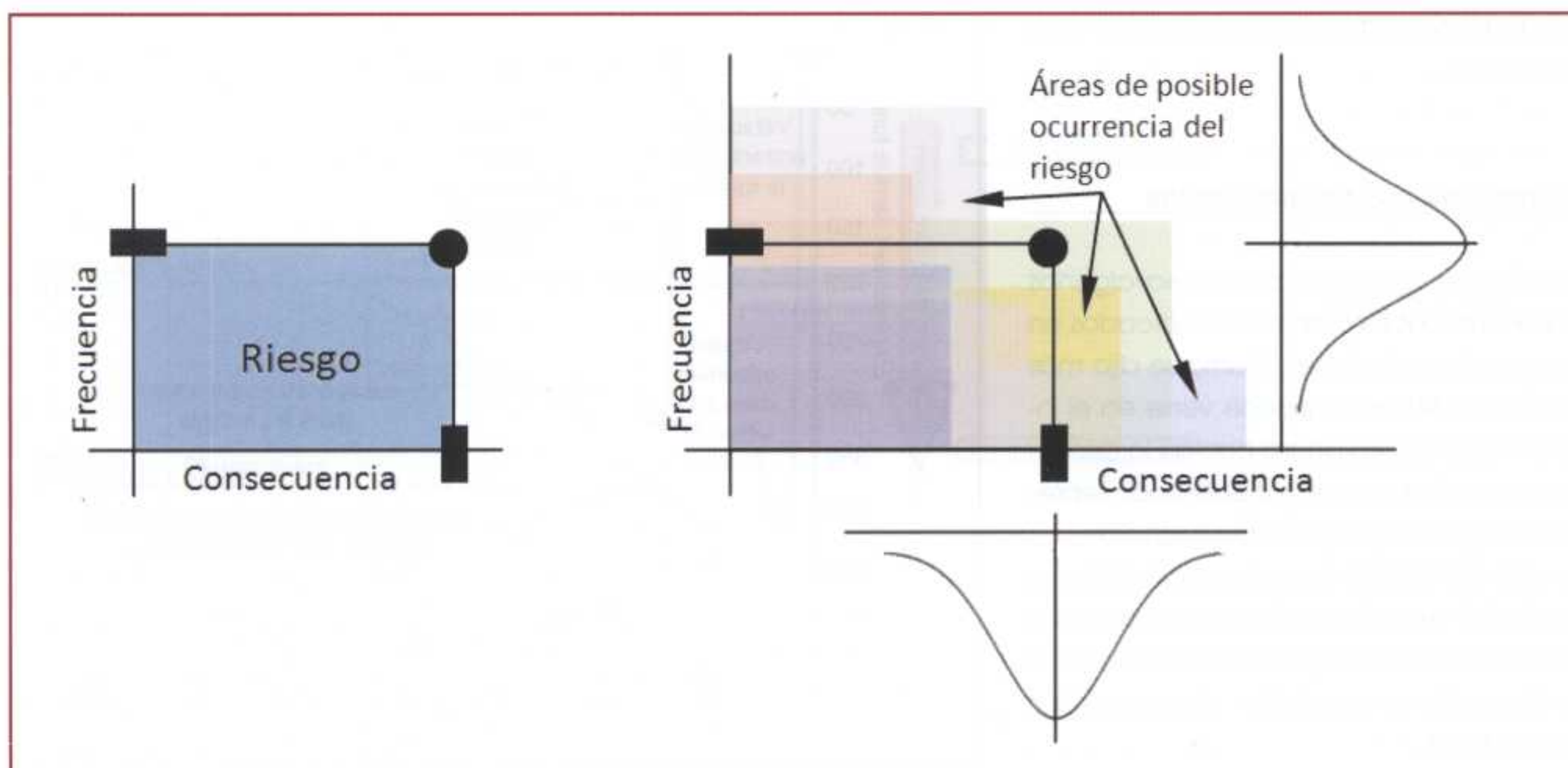


Fig. 4. Áreas de posible ocurrencia del riesgo

cias de sucesos con N muertos, de modo que la acumulada con la condición "superación de N ", conduce a la complementaria de la función de distribución (ya que esta última representa la probabilidad de los valores inferiores a un determinado N). Puesto que se tienen, tanto valores con baja probabilidad y alta consecuencias, como con alta probabilidad y bajas consecuencias, es costumbre representar la curva en escala logarítmica decimal.

La primera curva de este tipo fue propuesta por Farmer (1967) analizando escapes de reactores nucleares, por lo que a veces se indica que la F del par (F, N) con que se denominan las curvas es un reconocimiento a su apellido y no una referencia al carácter de función de distribución complementaria.

De hecho un diagrama (F, N) es otra forma de representar la información habitual, pues la diferencia entre $F(N)$ y $F(N+1)$ es la frecuencia de accidentes con exactamente N muertos $f(N)$, y como ésta es no negativa $F(N) \geq F(N+1)$ por lo que la curva (F, N) debe ser decreciente. Obsérvese que debido a ello $F(1)$ es la frecuencia de muertes totales y el valor $f(N)$ puede escribirse como $F(1) \cdot p(N)$ donde $p(N)$ es la probabilidad de que un accidente produzca exactamente N muertos.

El sistema representado es tanto más seguro cuanto más baja esté su curva en el diagrama, pues tanto menor será la frecuencia de muertes.

Fue el gobierno holandés quien tomó la iniciativa en 1988 de promover un criterio dividiendo el primer cuadrante del dominio (F, N) en tres zonas mediante

dos líneas rectas con pendientes -2 . La zona exterior representa una situación inaceptable, la próxima al origen la aceptable y la intermedia era llamada ALARA donde debían procurarse reducciones dirigidas por el principio "As low As Reasonably Achievable".

La pendiente común en dos rectas significa que ambas representan la misma distribución de probabilidad siendo la ordenada en el "origen" $F(1)$ la que diferencia del número total de víctimas.

El Health and Safety Executive (HSE) inglés decidió en 1991 sugerir un criterio semejante pero tomando líneas con pendiente -1 , menos exigentes por tanto respecto a los accidentes de menor probabilidad y más muertos y definiendo la zona intermedia como ALARP esto "As Low Reasonably Practical".

De hecho la elección del criterio es puramente convencional y una expresión del tipo

$$F(N) \leq \alpha / N^\beta$$

se refleja en unas rectas de pendiente $-\beta$ que puede producir incongruencias como que la combinación lineal de dos estados seguros conduzca a otro inseguro. Además del riesgo social se utiliza también como indicador el valor medio de muertes al año obtenido al integrar la curva de densidad de probabilidad con lo que se obtiene el "valor esperado" EV y a, partir, de él, el **riesgo individual**, cuyo valor admisible se fija en 10^{-7} /personas-Km, como cociente

entre EV y el numero normal de personas-kilómetro que pasan por el túnel.

4. Descripción somera de algunas propuestas

Desde la emisión de la directiva europea algunos países han planteado en los foros técnicos indicados en el apartado 2 sus propias soluciones. Como se dijo más arriba un enfoque muy detallado puede verse en el informe PIARC de 2008 donde los países que así lo desearon, enviaron las propuestas que se consideraban representativas así como algunos ejemplos de aplicación.

A excepción del DG-QRAM que, generalmente, es aceptado en todos los países como herramienta adecuada para el estudio del transporte de mercancías peligrosas, a continuación se comentan algunos de los casos más representativos.

Debe recordarse que la Directiva deja en libertad al organismo regulador de cada país para elegir el método que considere más adecuado.

4.1 Método CETU

El enfoque francés es de tipo pragmático: determinista, cualitativo-cuantitativo que aprovecha la experiencia adquirida tras el análisis de la seguridad de los túneles de más de 300m existentes o en proceso de construcción en Francia después del accidente de Mont Blanc, y está descrito en el volumen 4 de la Guía de Documentación para la Seguridad editado por el Centro de Estudios de Túneles (CETU).

El estudio cuantitativo de las frecuencias de los sucesos desencadenantes y una aplicación al túnel en estudio permite una clasificación de escenarios de acuerdo con una matriz frecuencia-consecuencias como la indicada en la figura 11.

Una vez separados los escenarios menos agresivos se lleva a cabo un estudio cuantitativo de las consecuencias en un conjunto representativo extraído de la matriz anterior.

Es decir, se prescinde del ala izquierda de la "mariposa" y se pasa directamente al estudio de escenarios con modelos tipificados de fuego. En ellos se acopla el modelo del desarrollo del fuego con otro de tráfico y de evacuación clásico en un diagrama x-t (figura 5).

Con ello en túneles existentes que no cumplan las condiciones de la Directiva se ve hasta qué punto queda comprometida la seguridad. También se pueden

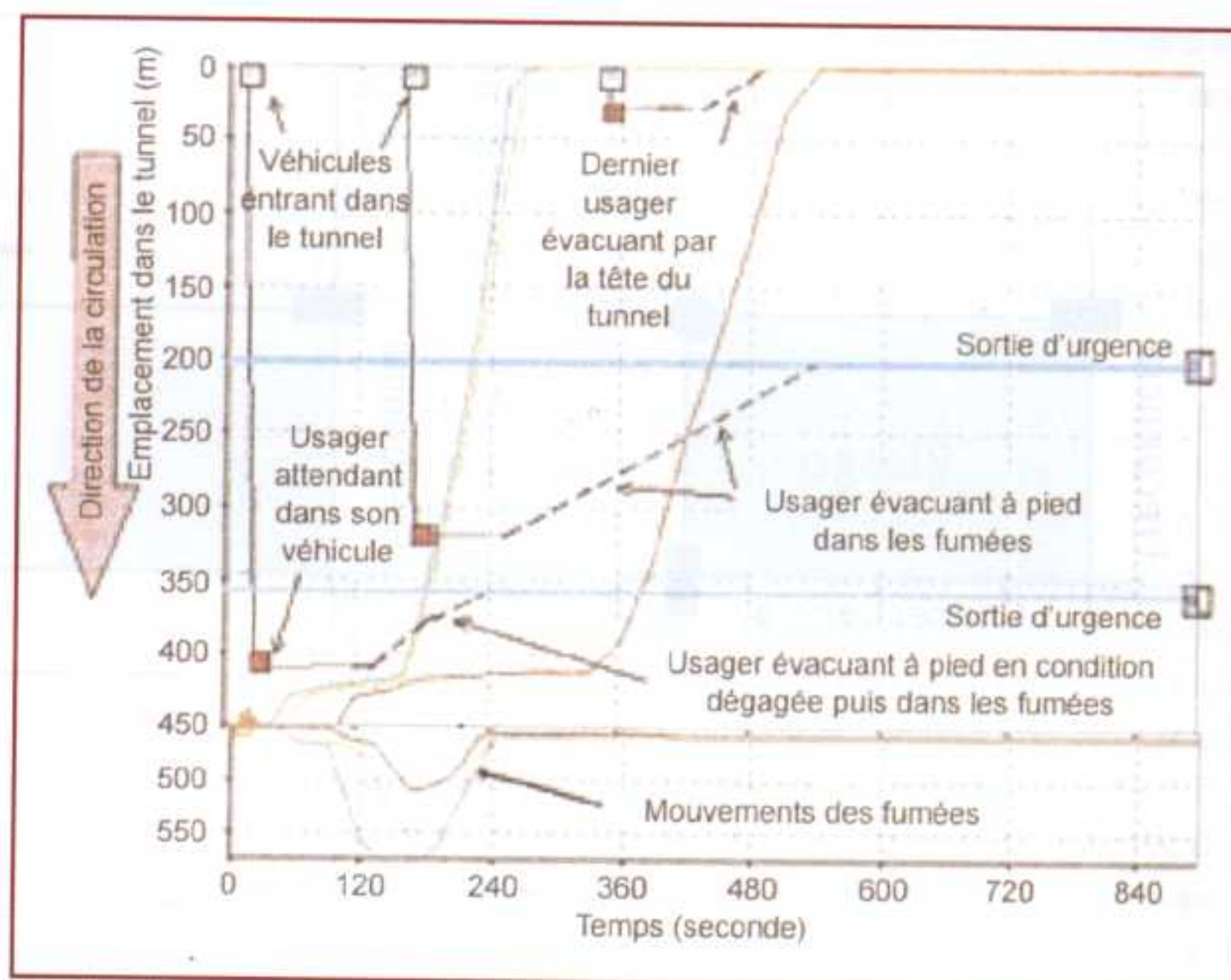


Fig. 5. Comparación de la evolución de los contaminantes con las dosis recibidas por el trayecto de personas que se mueven hacia las salidas de emergencia o los vehículos.

modelar las medidas tendentes a reducir las consecuencias.

Como se ve, el centro de la cuestión se fija en la seguridad del usuario y en su interacción con el equipamiento y medidas que puedan ayudarle a su auto evacuación.

Solo se utilizan modelos monodimensionales reservándose el uso de CFD para situaciones especiales y no se recurre a ningún diagrama (F, N).

Así, la flexibilidad del método estriba en su aprovechamiento de la experiencia y la versatilidad de los modelos sencillos.

Sin embargo no es adecuado para los transportes de mercancías peligrosas, para cuyos estudios se usa el programa DG-QRAM.

4.2 Métodos holandés (TUNPRIM) y austríaco (TuRisMo)

Estos métodos utilizan un enfoque cuantitativo, sistémico y determinista (en el sentido expuesto al final del punto 3.1).

Los árboles de fallo del ala izquierda de la "mariposa" son sustituidos por un análisis estadístico de la base de datos que permite iniciar el proceso tras identificar una serie de sucesos desencadenantes. Es decir, el punto de arranque del estudio es el accidente.

El método austríaco sigue un esquema similar basado en estadísticas propias de los sucesos iniciales (tasas de accidentes) y la distribución (frecuencias

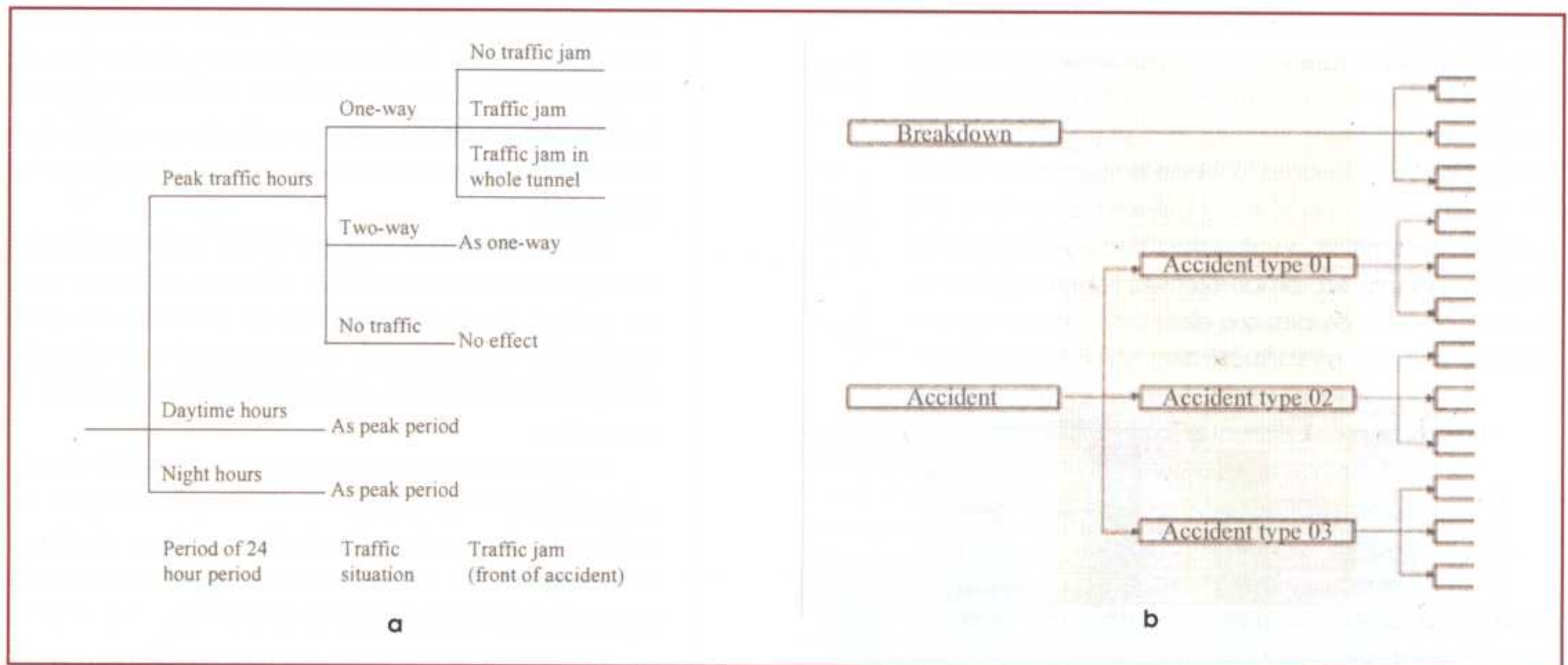


Fig. 6.

relativas) entre las diferentes ramas (figura 6b). Respecto al estudio de consecuencias ambos métodos combinan un modelo de propagación del humo con otro de evacuación para cuantificar las consecuencias.

En el caso holandés se distinguen tres áreas que pueden variar de escenario a escenario. (figura 7).

1. Un área segura cerca de las puertas de escape.
2. Un área en la que cierto porcentaje de las personas que intentan escapar no lo consiguen y que

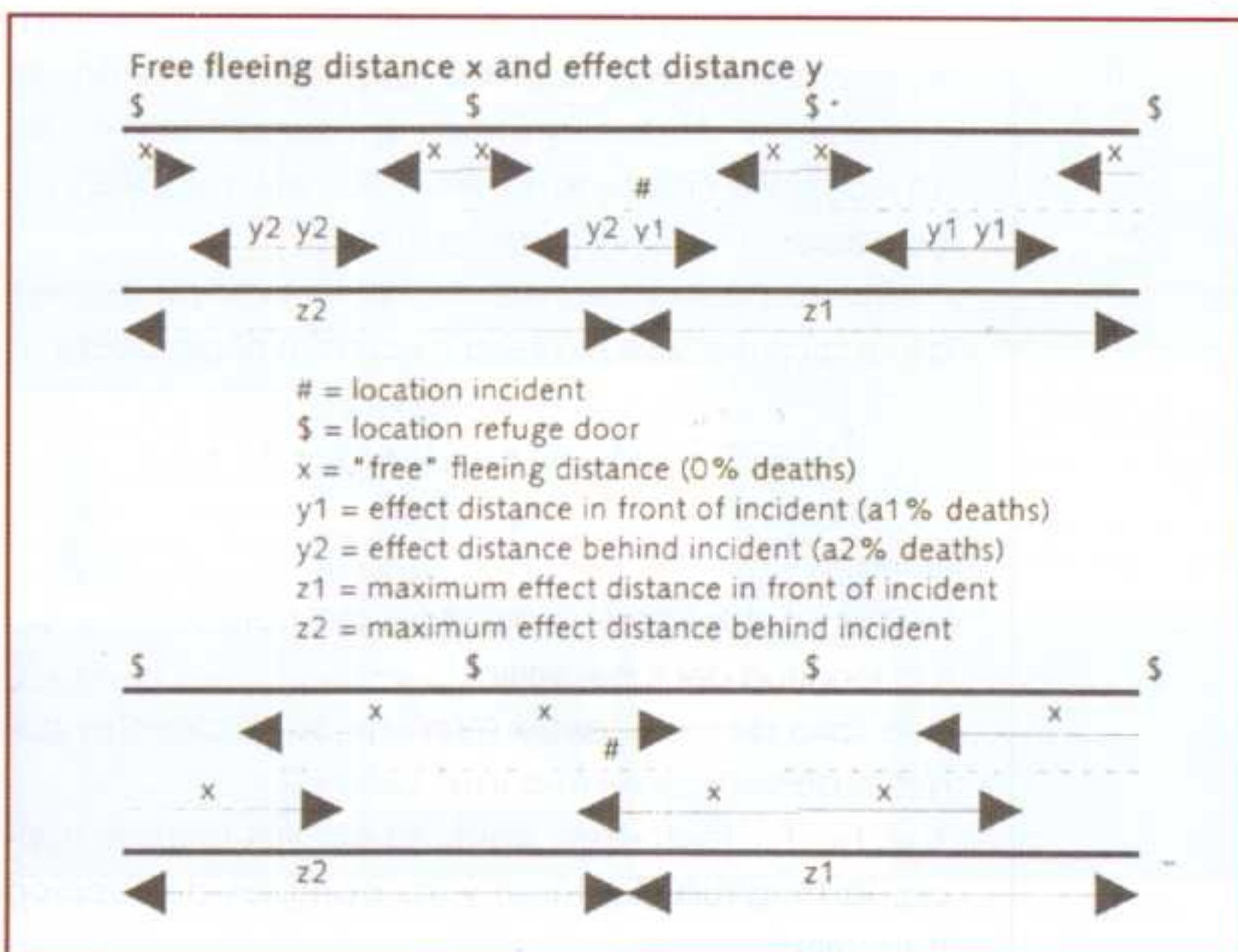


Fig. 7.

incluye a los que quedan atrapados en su vehículo tras un accidente.

3. Un área adicional provocada en los casos en que el accidente bloquea una puerta de escape.

En el caso austríaco las consecuencias se separan en:

1. Escenarios que tienen como consecuencia **efectos mecánicos**, con una estadística basada en datos adquiridos en el período 99-03 mediante 450 accidentes en 81 carreteras distintas, 61 túneles unidireccionales y 20 bidireccionales.
2. Escenarios con fuego que se estudian mediante una docena de casos típicos, modelos de propagación generalmente monodimensionales y modelos de evacuación basadas en el programa EXODUS.
3. Escenarios provocados por materias peligrosas que, por el momento, solo se tratan de forma sumaria mediante fórmulas analíticas o juicio de expertos.

Los resultados se presentan indicando el riesgo individual de los usuarios y el EV (muertes/año) que en el caso austríaco se separa en efectos mecánicos, fuegos, y mercancías peligrosas según se dijo antes.

Por su parte TUNPRIM dibuja gráficos F-N como el indicado en la figura 9, donde puede observarse que como límite admisible para el riesgo social se usa la lí-

SHARE IN RISK			Mechanical effects	Fire	Dangerous goods
Societal risk – Expected value (fatalities/year)					
Existing tunnel (25% heavy goods vehicles)	0.139		86%	14%	< 1%
Existing tunnel (15% heavy goods vehicles)	0.128		85%	15%	< 1%
Reference case					
Measure: cross passages every 250 m	0.131		91%	9%	< 1%
Measure: second tunnel tube	0.045		97%	< 1%	3%
Measure: reduction of velocity 60 km/h instead of 80 km/h	0.101		81%	19%	< 1%

Figure D - Graphical overview of results of case study

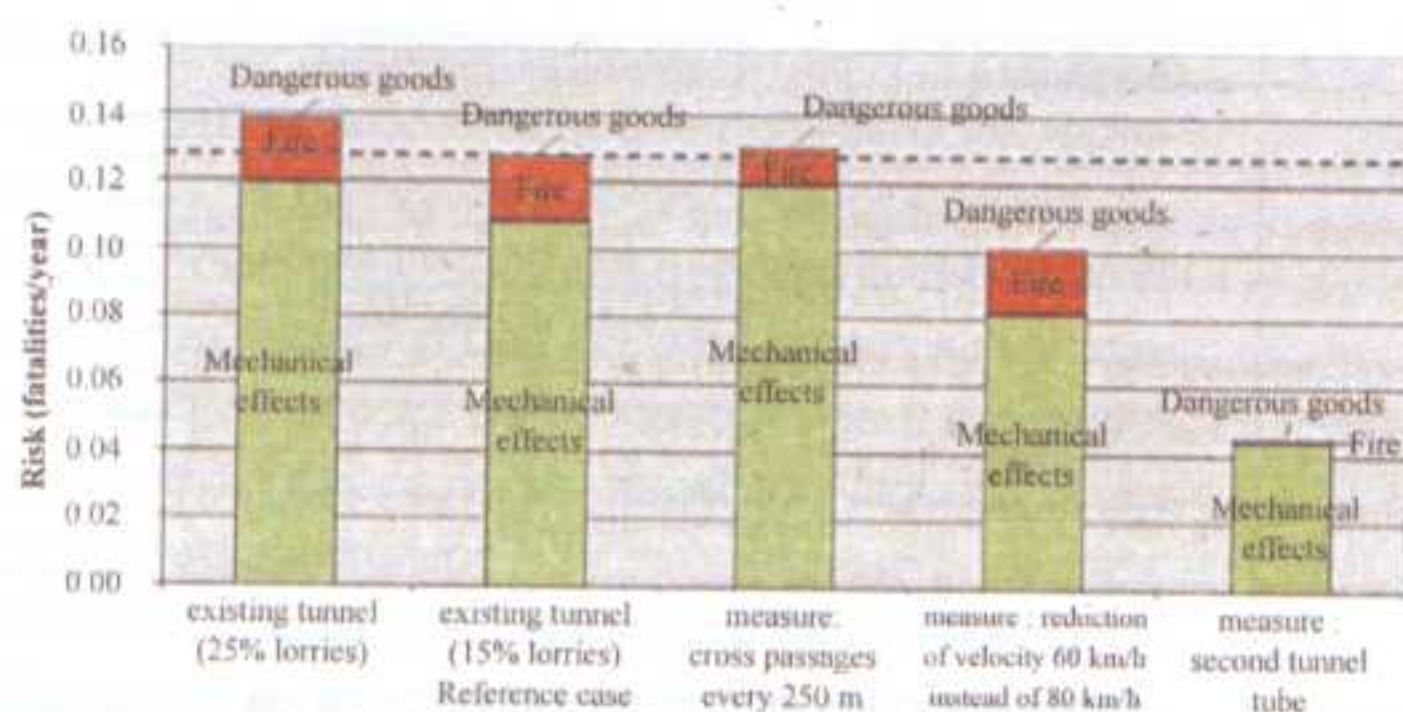
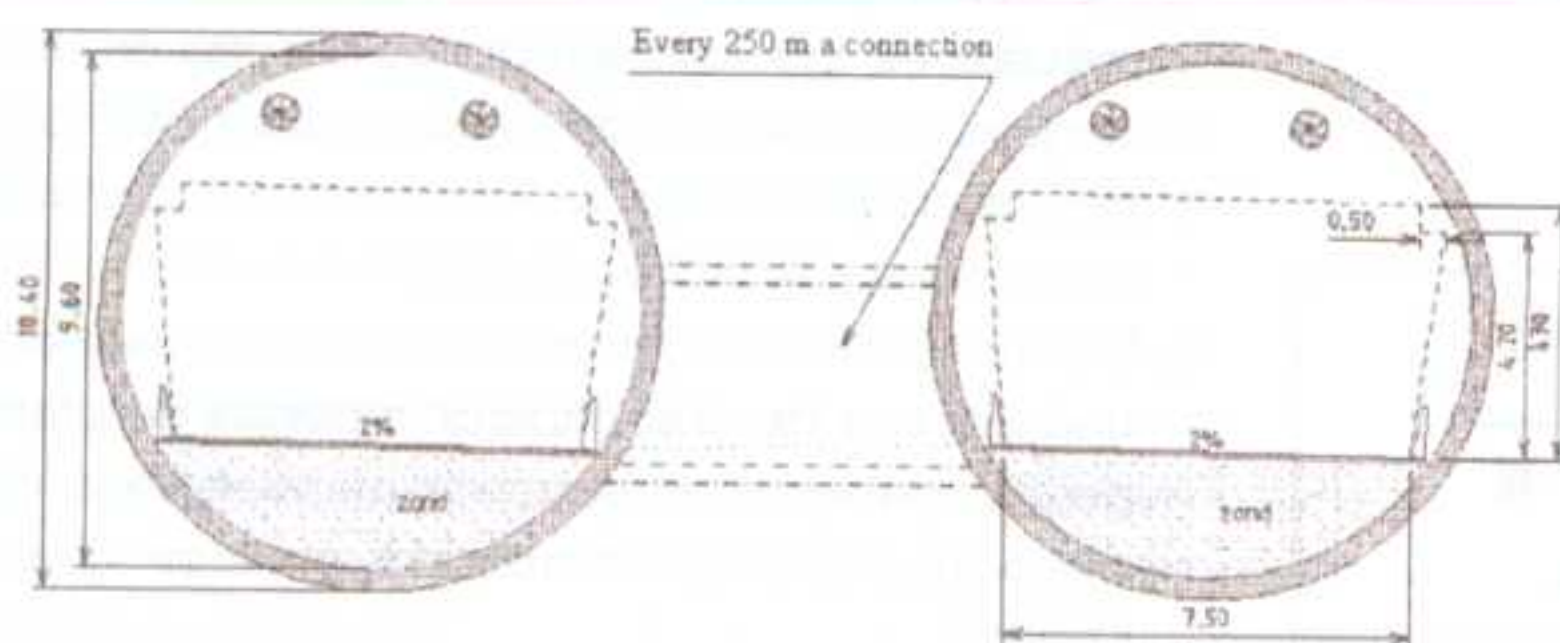


Fig. 8. Caso comparativo de escenarios extraído del informe PIARC 2008.

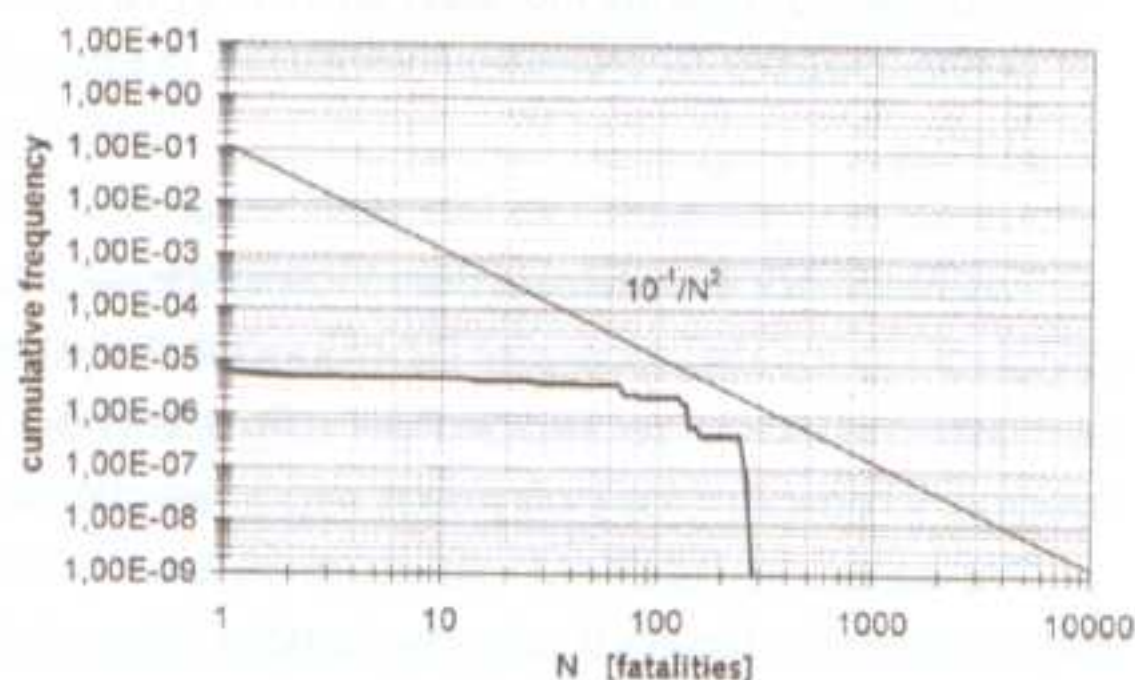
nea $10^{-1}/N^2$, es decir aunque se mantiene para $N(1)$ el valor del 10%, la pendiente de la recta es -2 según la tradición holandesa.

Debe observarse también que el método holandés se refiere a túneles monodimensionales con

Fig. 9. Gráficos F-N.



Societal Risk (Internal Safety Risks)



ventilación longitudinal mientras que TuRisMo puede aplicarse a todo tipo de ventilación y todo tipo de túneles y accidentes con heridos. A cambio TUNPRIM incluye el caso de mercancías peligrosas mientras que el método austriaco debe completarse con el DGQRAM.

Una ventaja muy importante de ambos métodos es la posibilidad de utilizar los resultados para comparar entre sí los efectos relativos de diferentes mejoras destinadas al incremento de seguridad o la situación comparativa respecto al túnel patrón descrito en la normativa.

La figura 10 incluye un ejemplo de TUNPRIM donde se explora la mejora experimentada por un túnel, inicialmente, sin puertas de seguridad y cómo, gracias a la incorporación de éstas, se consigue hacerlo más seguro que el túnel patrón de referencia.

Un inconveniente de la representación en escala logarítmica es que el ojo poco avezado puede considerar estas mejoras no tan importantes, por lo que el cálculo del valor esperado EV (muertes por año) se añade a las gráficas anteriores bien como referencia adicional en el caso holandés, bien como resultado único en el caso austriaco.

Este último incorpora también un **método simplificado** que está pensado como primera fase en el proceso de cribado de túneles existentes.

La fórmula empleada es:

$$R = H \cdot S$$

Donde el parámetro S es el valor medio del daño debido a los accidentes, es decir representa sus consecuencias; fue ajustado aplicando TuRisMo en un conjunto típico de túneles. Sus valores están tabulados.

Por su parte H representa los motivos principales de accidente y se expresa mediante el producto:

$$H = 3.65 \cdot 10^{-4} \text{ IMD} \cdot L \cdot U \cdot f_{VK} \cdot f_{TL} \cdot f_{VF}$$

Donde:

IMD es la intensidad media diaria del tráfico.

L la longitud del túnel en km.

U la tasa de accidentes (número de accidentes por millón de vehículos-km-año)

f_{VK} , f_{TL} , f_{VF} factores correctores del volumen de tráfico, la longitud del túnel y los cambios de sección transversal.

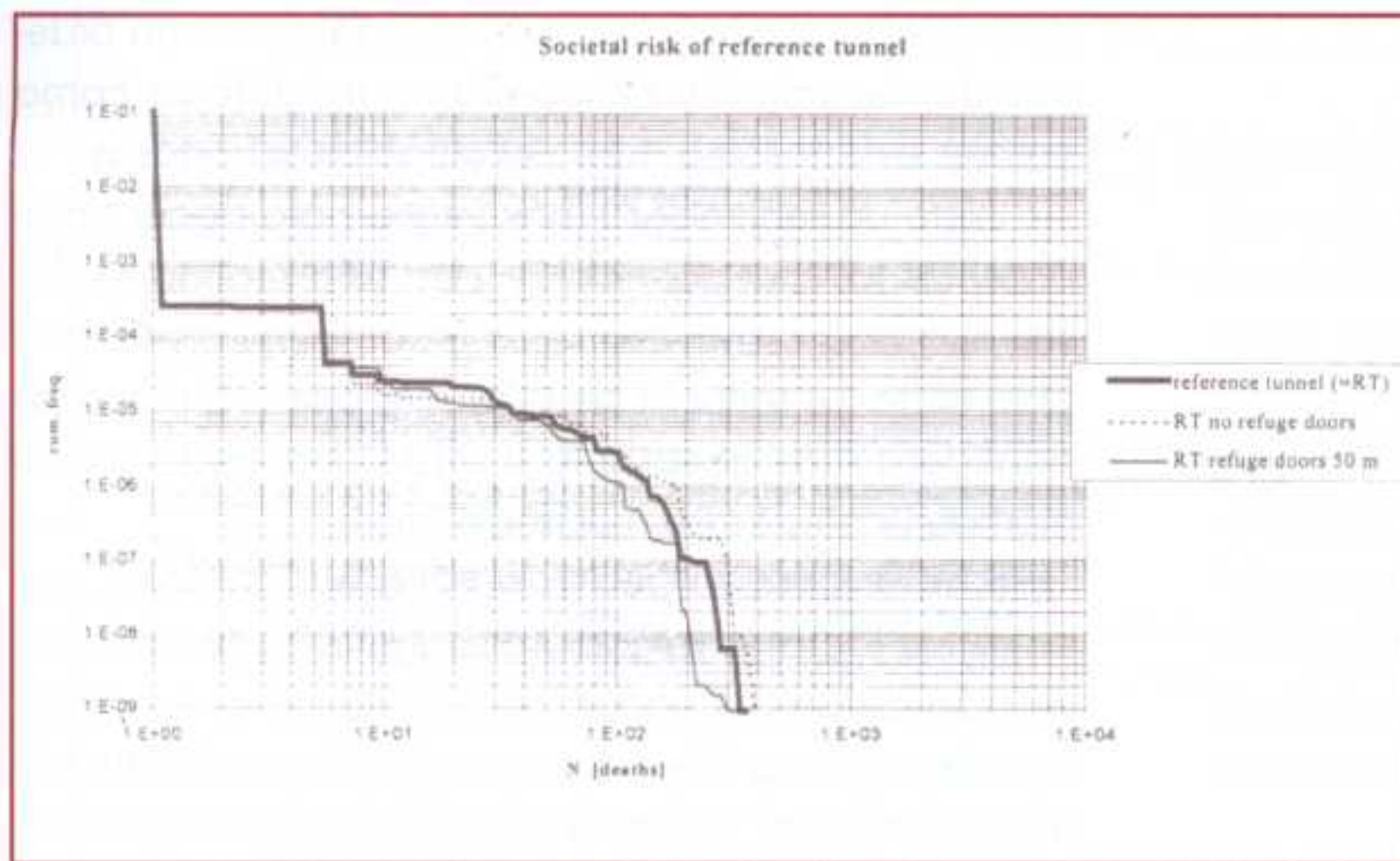


Fig. 10. Ejemplo de TUNPRIM.

El factor $3.65 \cdot 10^{-4}$ traduce los cambios de unidades entre la IMD y U.

4.2. El método italiano (IRAM)

El método italiano IRAM (o EURAM según se presentó en la reunión de Verona) reúne las condiciones para ser calificado como un método sistémico, cuantitativo y probabilista.

Según Focaracci que es su más activo publicista, utiliza el diagrama mariposa al completo y se adapta a la normativa europea y su versión italiana de 2006. Mediante procedimientos de inferencia estadística y estimación bayesiana permite actualizar los datos del modelo y mejorar la fiabilidad de las estimaciones.

Lo que marca la diferencia con los métodos precisados es la definición de leyes de distribución de probabilidad para los fenómenos y el recurso al método de Montecarlo para resolver estadísticamente la evolución de la peligrosidad y el proceso de evacuación. Ello unido a la técnica de inferencia bayesiana del análisis de los árboles de fallos y de sucesos así como de los accidentes permite hablar de una herramienta muy completa, aplicable a cualquier tipo de túnel, incluidos los de ferrocarril, y capaz de analizar también el transporte de mercancías peligrosas.

El riesgo se determina mediante la operación:

$$R = \sum_{i=1}^N P(S_i) \cdot \text{Sim Re}(S(S)_i)$$

donde el primer factor representa la probabilidad de ocurrencia del escenario i -ésimo y $\text{Sim Re}(S(S)_i)$ son las consecuencias, obtenidas mediante la simulación del i -ésimo escenario, expresadas en número de muertes.

El riesgo individual se obtiene dividiendo el colectivo por el número de personas expuestas al riesgo por kilómetro y año recorrido en el túnel.

El riesgo social se representa en un diagrama F-N (figura 12).

Donde la región ALARP se ha subdividido en otras tres con los valores $N(1) = 1.E-2$ y $1.E-3$ respectivamente para indicar zonas en que protocolos de emergencia, sistemas de seguridad o limitaciones de tráfico deban ser establecidas.

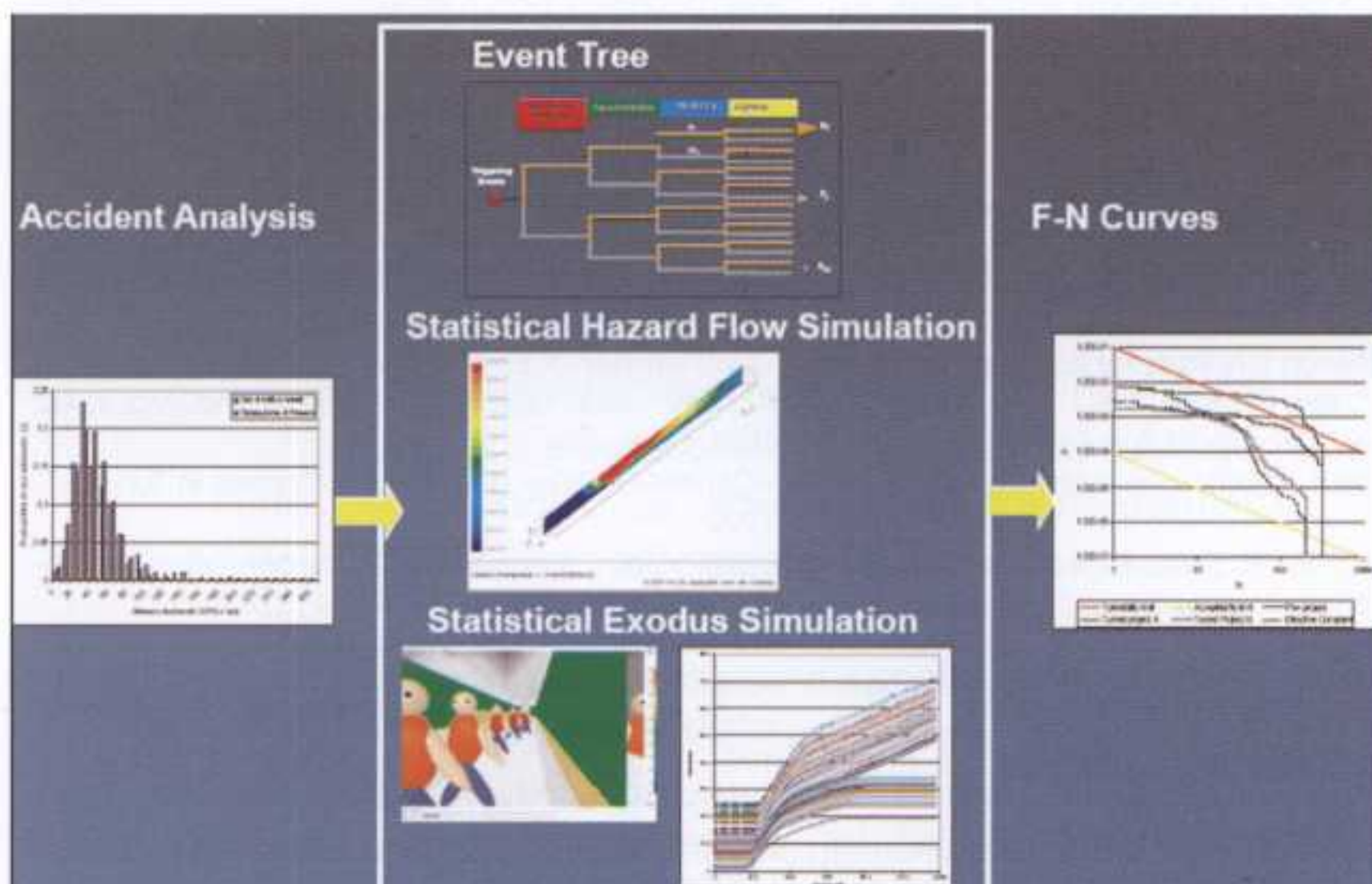


Fig. 11. Esquema general que incluye el acoplamiento sucesivo de los modelos de peligrosidad- evacuación, para llegar a las curvas F-N semejantes a las anteriores.

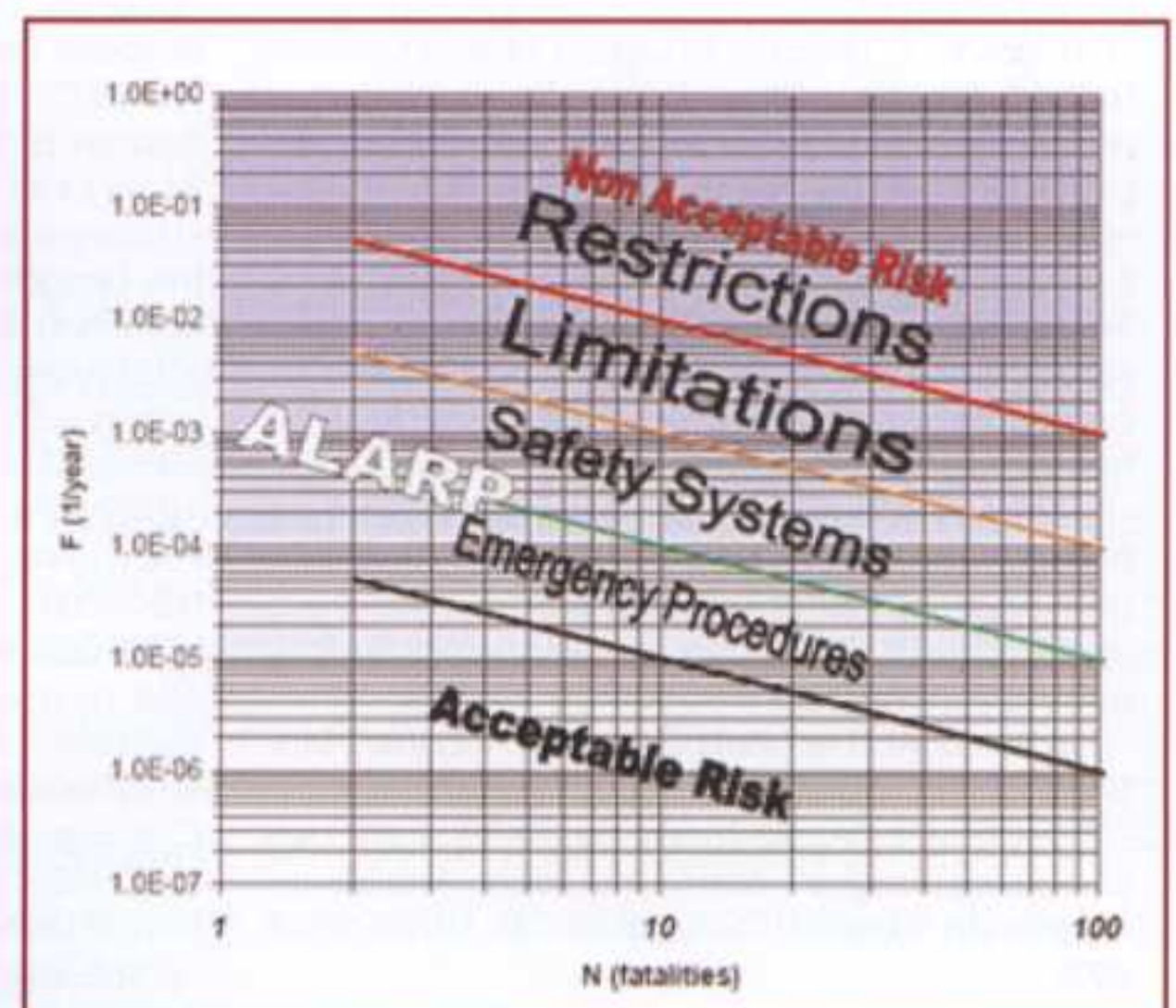


Fig. 12. Diagrama F-N donde se representa el riesgo social.

5. Conclusiones

La libertad otorgada por la Directiva Europea ha hecho que cada país adapte sus procedimientos a la tradición existente en los mismos con anterioridad. Algunos países como Alemania, Suiza o España están en camino de desarrollar su propio enfoque.

Es instructivo que el informe de PIARC de 2008 concluya indicando que ninguno de los métodos propuestos pueda reclamar el título de "más adecuado" y que ninguno cubra todas las incertidumbres de forma perfecta por lo que finaliza con el desconsolado convencimiento de que las posibilidades de armonización a nivel europeo son muy limitadas.

También acaba con unas reflexiones que rebajan los posibles entusiasmos y previenen sobre el uso por personas inexpertas. Muy interesante es la observación respecto al equilibrio que debe mantenerse entre la complejidad del método y la estrategia utilizada para alcanzar los niveles de seguridad, así como a la comprobación previa de la base de datos que va a ser utilizada y su compatibilidad con las características del túnel que haya que analizar.

Para apoyar su recomendación final, sobre la importancia de encomendar el trabajo a un experto, el informe PIARC recalca que, a pesar del refinamiento

del método utilizado los resultados sólo indican órdenes de magnitud y no pueden considerarse como valores exactos sino como evaluaciones borrosas.

Existe un sentimiento mayoritario para hacer transparentes los procedimientos y en este sentido se observa, que una mayoría sigue un principio bien conocido entre los teóricos de la percepción: "El riesgo: se considera más aceptable si existe una cierta sensación de control individual del mismo".

En este caso se podría parafrasear diciendo que entre los factores psicológicos que influyen en la selección de un método, (cuyas limitaciones los profesionales conocen bien, como no podía ser de otra forma), siempre se tiende a seleccionar aquél que permite controlar personalmente el flujo del proceso, ya que se está ante un instrumento delicado cuyo mal uso puede conducir a soluciones insensatas.

Lo cierto es que el aumento de capacidad y velocidad de cálculo de las computadoras actuales permite desarrollar en toda su potencia los métodos probabilistas y que todo ello contribuirá a un incremento del conocimiento, la optimización de las soluciones y la toma racional de decisiones.

En cualquier caso el cambio de paradigma se ha producido y la profesión deberá adaptarse a su uso en la actividad cotidiana. ♦

Referencias:

- (1)ADR 2007. Acuerdo Europeo sobre el transporte Internacional de mercancías peligrosas por carretera (ADR)
- (2)Alarcón, E. Lección Inaugural Máster Universitario en Túneles y Obras Subterráneas. "Enfoque probabilista de algunos temas de proyecto y explotación". AETOS. Febrero 2007.
- (3)Alarcón, E.: "La Seguridad de las Infraestructuras. El caso de los incendios en Túneles". Real Academia de Ingeniería. 2002
- (4)Alarcón, E; Liñán A. "Seguridad frente a incendio en túneles". Febrero 2002. REAL ACADEMIA DE INGENIERÍA.
- (5)Arnauld A. & Nicole P.: "La logique on l'art de penser". 1662 en A. Lopez; J.I Lujan: "Ciencia y política del riesgo". Alianza 2000.
- (6)Bedford T. & Cooke R.: "Probabilistic Risk analysis" Cambridge U.P 2001
- (7)Bunn D.W. "Applied Decision Analysis" Mc. Graw. 1984
- (8)Del Rey, I. "Actividades de PIARC y ATC en análisis de riesgos". Seminario sobre Análisis de riesgos en túneles. Colegio ICCP. Noviembre 2006
- (9)Del Rey, I. "Experiencia en el análisis cuantitativo de riesgos en túneles en España". Jornadas Técnicas sobre la explotación y la gestión de riesgos en túneles viarios. Colegio ICCP. Sept. 2004
- (10)Del Rey, I; Vega, J; Fraile, A.; Alarcón, E. "Cuantificación de la seguridad en túneles". IV Simposio de túneles. Andorra, Octubre 2005.
- (11)EEC. "Major accident hazards of certain industries activities". Council Directive 82/501/EC. 24 de Junio 1982
- (12)Ennemark F. y Nohr H.: "Safety Concepts for the Drogden Tunnel" Conference on "Fire Protection in Traffic Tunnels", Dressden. 1995
- (13)Evans, A.W. and Verlander N.Q. "What is wrong with criterion F-N lines for judging the tolerability of risk?". Risk analysis. 1997
- (14)Evans, A.W. "Transport fatal accidents and F-N Curves: 1967 - 2001". Research report 073. HSE. 2003
- (15)Foccaracci, A.; Cafaro, E. "Lo studio del livello di rischio di una galleria". Strade&Autostrade. 1-2009.
- (16)Freudenthal, A: Selected papers. Am. Soc. Civil Eng. 1981
- (17)HSE: "Major Hazards Aspects of the Transport of Dangerous Goods". HMSO. 1991
- (18)JORNADAS TÉCNICAS SOBRE TÚNELES. La Seguridad en la Construcción y en Servicio. Gijón, 22 a 24 de Junio de 1994.
- (19)Kaplan, S.; Garrick J. "On the quantitative definition of risk" Risk Analysis. 1981.
- (20)Karlsson, M.: "Risk Modelling of the Oresund Link Railway Tunnel" Int. Workshop on Statistical Risk Modelling 1995 Zurich
- (21)KIVI. "Ventilation of Road Tunnels. Recommendations" Royal Institute of Engineers (KIVI). Ministry of Transport, Public Works and Water Management. 1991.
- (22)"Linee-Guida per la progettazione della sicurezza nelle gallerie stradali". Fastigi. Abril 2005.
- (23)N.R.C: P.R.A Procedures Guide. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. 1983
- (24)Petersen K.E.: "European Model Evaluation Activity" Jour. Loss. Prev. Process. Ind. Vol 7. N2 1994
- (25)PIARC: "Fire and Smoke Control in Tunnels". 1999
- (26)PIARC: "Recueil de documentation". Congres Mondial Mexico. 1975
- (27)PIARC: "Risk Analysis for Road Tunnels". 2008
- (28)Schneider, J. "Introduction to Safety and Reliability of Structures". IABSE. Structural Engineering. 1997
- (29)Savy, M.: "Le Transport de Merchandises" Eyrolles 2007
- (30)Vesley et al. "Fault Tree Handbook". U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington. 1981